



Evaluation of deviation of solar-powered autonomous sprayer robot from the trained path at different speeds and surfaces

Alireza Ahmadlou¹ | Mohammad Askari^{2✉} | Davood kalantari³

1. Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: alireza1997king@gmail.com

2. Corresponding Author, Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.askari@sanru.ac.ir

3. Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: dkalantari2000@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 16, 2025

Revised: June. 30, 2025

Accepted: July. 8, 2025

Published online: Spring 2025

Keywords:

Garden sprayer,
Smart,
Rrobotic,
Routing,
YOLO v8

ABSTRACT

Robotics is a branch of engineering science that includes the design, construction, operation, and use of robots by computer systems, control, sensor feedback, and information processing. The ultimate goal of using robots in agriculture is to increase speed, accuracy, and precision in the stages of planting, tending, and harvesting crops. The overall goal of the present study is to evaluate the deviation of an automated solar sprayer robot used in gardens from the trained path. For this purpose, after training the path using the optimized YOLO v8 model for the solar-powered automatic sprayer robot, tests were conducted considering 2 input variables including 3 types of surfaces (asphalt, concrete, and gravel soil) and 3 forward speeds (1, 2, and 3 km/h), and the amount of deviation of the robot from the trained path was measured as the output variable. The results showed that the optimized YOLO v8 model, with its high accuracy and generalizability, is suitable for practical applications such as autonomous robot navigation in garden environments. Both factors of forward speed and surface type had a significant effect on the amount of deviation of the robot from the trained path, such that the robot had the highest amount of deviation at high speed (3 km/h) and uneven road surface (dirt road with gravel) and the lowest amount of deviation at low speed (1 km/h) and smooth surface (asphalt).

Cite this article: Ahmadlou, A., Askari, M., Kalantari, D., (2025) Evaluation of deviation of solar-powered autonomous sprayer robot from the trained path at different speeds and surfaces, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56 (1), 83-99. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.393592.665594>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.393592.665594>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The growing global demand for food, coupled with the need to support the emergence of technologies that can meet environmental standards as well as promote efficiency and healthy working environments, poses a major challenge for agriculture. Agricultural land is limited and can only be expanded slightly. Precision spraying represents an innovative approach that can help farmers spray only when needed, using the right amount of chemicals. Precision spraying can help meet regulatory requirements in terms of worker health, environmental sustainability, and food safety and quality. The best solution to this problem is to carry out pesticide spraying without human intervention and use a robotic system in agriculture. Agricultural robots are used to work in greenhouse and garden environments and play a very important role in agricultural activities. According to the survey, no research has been conducted so far on evaluating the deviation of an automated solar sprayer robot from the trained path at different levels and speeds.

Materials and Methods

The solar-powered automatic sprayer robot was equipped with accessories such as a chassis, wheels, electric motor, gearbox, solar panel, and power storage battery, etc. Field tests were conducted on two factors: surface type and forward speed. For this purpose, after training the route using the optimized YOLO v8 model for the solar-powered automatic sprayer robot, tests were conducted considering two input variables including three surface types (asphalt, concrete, and gravel soil) and three forward speeds (1, 2, and 3 km/h), and the amount of deviation of the robot from the trained route was measured as the output variable. The robot's deviation (in centimeters) from the original path was calculated with an assumed width of 50 centimeters.

Results and Discussion

Using morphological processing and thresholding methods, road lines were extracted and the upper and lower edge points of the road were determined using the contours of the largest white areas. Finally, red lines were drawn as the side lines of the road to identify the outer areas of the route. A yellow line was also drawn as the center line of the road as a navigation guide. The processed output images show that Gabor filters help identify and separate the road from the background by detecting edges and road structures. This filter also highlights the road lines and distinguishes them from other parts of the image, which is very important for robot navigation on uneven and varied paths. The YOLO model was used to identify road areas and create masks required for more accurate processing. The results showed that high speed and rough road surface are the two main factors in increasing the robot's deviation from the path. Analysis of the results of the YOLO v8 model in identifying garden paths indicates its high performance in accuracy, recall, and reduction of false positive and negative errors. The optimized YOLO v8 model, with its high accuracy and generalizability, showed very good performance in the navigation of the sprayer robot and is very suitable for practical applications such as automatic navigation in garden environments.

Conclusion

Image processing using Gabor filters and morphological processing methods helped improve the accuracy of the model and was able to distinguish the features of the paths well. Comparison of the results with previous research shows that the new model has significant improvements over other methods and is suitable for practical applications in the field of automatic navigation and garden path recognition. These findings can be useful for optimizing robot guidance algorithms in different environmental conditions and speeds.

Author Contributions

Conceptualization, A.A. and M.A.; methodology, A.A.; software, D.K.; validation, M.A., formal analysis, D.K.; investigation, M.A.; resources, A.A.; data curation, M.A.; writing—original draft preparation, M.A.; writing—review and editing, D.K.; visualization, A.A.; supervision, M.A.; project administration, M.A.; funding acquisition, M.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی انحراف ربات سمپاش خودکار خورشیدی از مسیر آموزش داده شده در سرعت‌ها و سطوح متفاوت

علیرضا احمدلو^۱ | محمد عسکری^۲ | داود کلانتری^۳

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

alireza1997king@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

رایانامه: m.askari@sanru.ac.ir

۳. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

dkalantari2000@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	یکی از شاخه‌های علم مهندسی، رباتیک است که طراحی، ساخت، راه‌اندازی و کاربرد ربات‌ها توسط سیستم کامپیوتری، کنترل، عکس‌العمل حسگرها و پردازش اطلاعات را شامل می‌شود. هدف نهایی کاربرد ربات‌ها در کشاورزی، افزایش سرعت، دقت و ظرفیت در مراحل کاشت، داشت و برداشت محصول است. هدف کلی از پژوهش حاضر، ارزیابی انحراف ربات سمپاش خودکار خورشیدی مورد استفاده در باغ‌ها از مسیر آموزش داده شده است. بدین منظور پس از آموزش مسیر توسط مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده به ربات سمپاش خودکار خورشیدی، آزمون‌هایی با در نظر گرفتن ۲ متغیر ورودی شامل ۳ نوع سطح (آسفالت، بتنی و خاکی دارای سنگریزه) و ۳ سرعت پیشروی (۱، ۲ و ۳ کیلومتر بر ساعت) انجام گرفته و میزان انحراف ربات از مسیر آموزش داده شده بر حسب سانتی‌متر به عنوان متغیر خروجی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده، با دقت و قابلیت تعمیم بالای خود، برای کاربردهای عملی همچون ناوبری ربات خودکار در محیط‌های باغی مناسب است. سرعت پیشروی، نوع سطح و اثر متقابل آن‌ها بر میزان انحراف ربات از مسیر آموزش داده شده معنی‌داری بودند به گونه‌ای که ربات در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت و جاده خاکی دارای سنگریزه، بیشترین (۲۱/۴۱ سانتی‌متر) و در سرعت ۱ کیلومتر بر ساعت و سطح آسفالت، کمترین (۴/۲۹ سانتی‌متر) میزان انحراف را داشت.
واژه‌های کلیدی: سمپاش باغی، تصحیح مسیر هوشمند، رباتیک، مسیریابی، YOLO v8	
استناد: احمدلو؛ علیرضا، عسکری؛ محمد، کلانتری؛ داود، (۱۴۰۴) ارزیابی انحراف ربات سمپاش خودکار خورشیدی از مسیر آموزش داده شده در سرعت‌ها و سطوح متفاوت	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.393592.665594	مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ایران، ۵۶ (۱)، ۸۳-۹۹.



مقدمه

تقاضای روز افزون جهانی برای غذا همراه با ضرورت حمایت از ظهور فناوری‌هایی که بتوانند استانداردهای زیست‌محیطی را برآورده کنند و همچنین کارایی و محیط‌های کاری سالم را ارتقا دهند، یک چالش بزرگ برای کشاورزی است. زمین‌های کشاورزی محدود بوده و فقط می‌توانند اندکی افزایش یابد، بنابراین می‌بایست با همان منابع از طریق کشاورزی دقیق و هوشمند، محصول بیشتری تولید گردد. کشاورزی دقیق با کاهش مقدار آفت‌کش‌های استفاده شده و منابع صرف شده برای ماشین‌آلات به محیط‌زیست کمک می‌کند (Han et al., 2020). از طرفی، سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و سایر مطالعات تحقیقاتی تخمین می‌زنند که ۲۰ تا ۴۰ درصد محصولات جهانی به دلیل آفات و بیماری‌های گیاهی از بین می‌روند که با سمپاشی از آن جلوگیری خواهد شد (Cantelli et al., 2019). سمپاشی دقیق نشان‌دهنده روشی نوآورانه است که می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا فقط در صورت نیاز با استفاده از مقدار مناسب مواد شیمیایی، سمپاشی کنند (Ünal and Topakci, 2015). سمپاشی دقیق می‌تواند به تحقق الزامات قانونی، از نظر سلامت کارگران، پایداری محیطی و ایمنی و کیفیت مواد غذایی کمک کند. امروزه، بسیاری از کشاورزان از دستگاه‌های سمپاش دستی استفاده می‌کنند و مواد شیمیایی آفت‌کش‌های مضر در هوا پخش می‌شوند و ممکن است از طریق سیستم تنفسی وارد بدن کشاورزان و کارگران مزرعه شده و بیشتر اعضای بدن آنها را تحت تأثیر قرار دهند به طوری که طبق گزارشات متعدد، بسیاری از کشاورزان سلامتی خود را به همین دلیل از دست داده‌اند (Kurdi and Elzein, 2022). موضوع مسمومیت کشاورزان در فضای بسته مانند گلخانه حادث‌تر است و استنشاق آفت‌کش‌های مورد استفاده در گلخانه در برخی موارد می‌تواند کشنده باشد یا باعث آسیب دائمی به بافت ریه کاربر شود. تحقیقات نشان داده است که استفاده از لباس‌های محافظ حین عملیات سمپاشی، میزان احتمالی قرار گرفتن در معرض سم را کاهش می‌دهد اما آن را متوقف نمی‌کند (Riley and Siemsen-Newman, 2003). بهترین راه‌حل برای این مشکل، انجام سمپاشی بدون دخالت انسان و استفاده از یک سیستم رباتیک در کشاورزی است. ربات‌های کشاورزی برای کار در محیط گلخانه و باغ و مزرعه مورد استفاده قرار می‌گیرند و نقش بسیار مهمی در فعالیت‌های کشاورزی دارند که می‌توان به کاهش تعداد کارگر مورد نیاز، کاهش هزینه‌ها و افزایش عملکرد اشاره کرد. آنها همچنین می‌توانند برای کارهایی مانند تجزیه و تحلیل خاک و پایش دقیق محصول استفاده شوند (Meshram et al., 2022). یکی از انواع ربات‌های مورد استفاده در کشاورزی، ربات سمپاش با قابلیت حرکت در مزرعه، شناسایی هدف و تنظیم مکانیزم سمپاشی است. ربات‌های سمپاش باید در داخل گلخانه‌ها، تاکستان‌ها و مزارع کار کنند. باید از گذرگاه‌های بسیار باریک عبور کنند و در عین حال از آسیب‌زدن به گیاهان در مسیر حرکت خود اجتناب کنند. علاوه بر این، آنها باید عملکرد بسیار خوبی در دنبال کردن مسیر و مانورهای چرخشی در پیچ‌های مسیر خود داشته باشند (Sánchez-Hermosilla et al., 2013). از این رو، نیاز به سامانه‌های ناوبری خودکنترل در ربات‌ها برای انجام عملیات کشاورزی مانند کاشت بذر، پاشیدن کود، سمپاشی، بازرسی و حذف علف‌های هرز و چیدن میوه‌ها یک اصل حیاتی است. سیستم ناوبری ربات شامل حسگرها، عملگرها، شاسی و سیستم کنترل ربات هستند. از جمله حسگرهای ناوبری می‌توان به حسگر ژایروسکوپ، زاویه‌سنج، حسگرهای فراصوت، اینکودر^۱ و قطب‌نمای مغناطیسی اشاره کرد. ربات‌های سمپاش خودکار موجود قابلیت دنبال کردن صحیح مسیر را ندارند و تحقیقات در این زمینه همچنان ادامه دارد و توجه بسیاری از محققین بخش رباتیک در کشاورزی را به خود معطوف نموده است. این محققین در حال بررسی و اصلاح سیستم‌های مسیریاب موجود بر روی ربات‌های فعلی هستند.

علاوه بر این، توسعه سمپاش‌های خورشیدی مستقل با سیستم‌های ناوبری پیشرفته دارای پتانسیل زیادی برای افزایش بهره‌وری پاشش، کاهش هزینه‌های نیروی کار و جایگزینی روش‌های پاشش دستی در محیط‌های گلخانه‌ای و باغ است. استفاده از انرژی خورشیدی در سمپاش‌ها نه تنها به صرفه‌جویی در انرژی کمک می‌کند، بلکه آلودگی محیط زیست و خطرات بهداشتی مرتبط با سمپاش‌های سنتی دارای موتور درون سوز را به حداقل می‌رساند (Han et al., 2021; Devi and Balasubramanian, 2022). استفاده از انرژی خورشیدی برای تامین انرژی سمپاش‌ها جزء مهمی از این روند است زیرا این انرژی، منبعی تجدیدپذیر و پایدار را فراهم می‌کند که وابستگی به سوخت‌های فسیلی را بسیار کاهش می‌دهد. سمپاش‌های خورشیدی نسبت به سمپاش‌های سنتی، کارآمدتر و به صرفه‌تر هستند و هزینه‌های نیروی کار را کاهش و کارایی سمپاشی را افزایش می‌دهند (Bechar and Vigneault, 2017).

تحقیقات کمی در داخل و خارج از کشور بر روی ارزیابی انحراف از مسیر تعیین‌شده در خصوص ربات سمپاش خودکار خورشیدی

1 FAO
2 Precision Spraying
3 Encoder

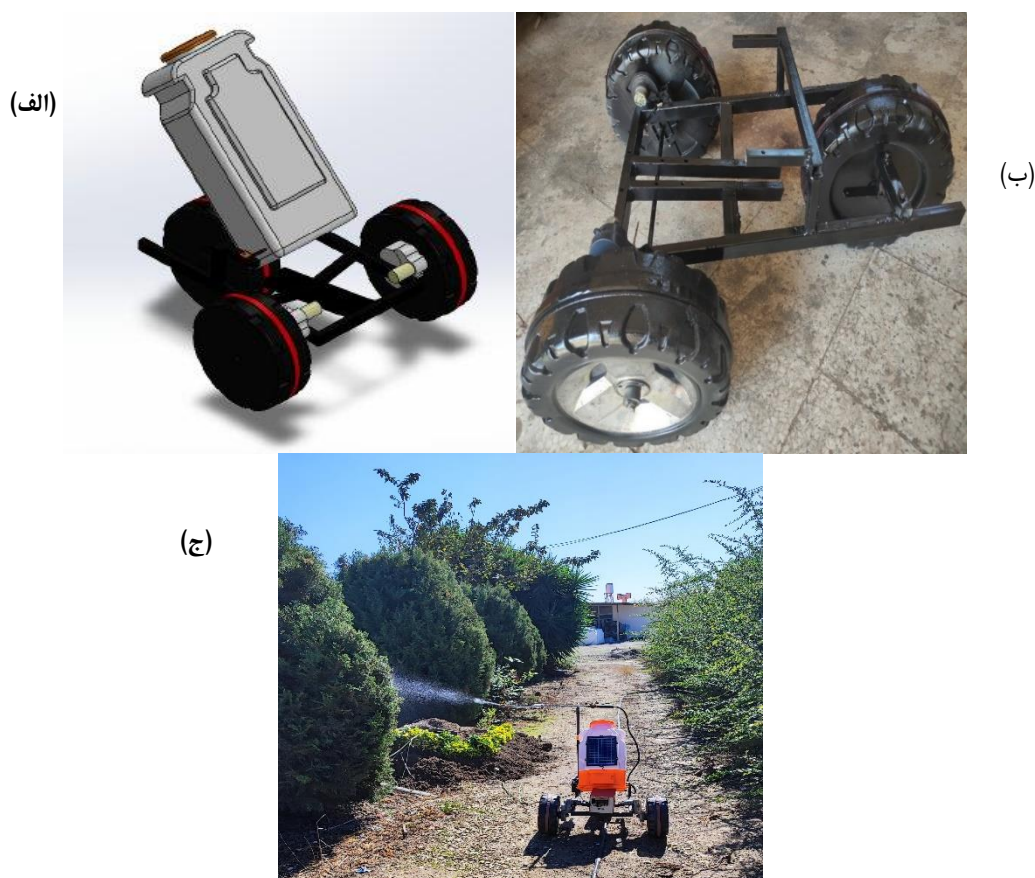
انجام شده است. اکثر تحقیقات بر طراحی و ساخت ربات سمپاش و مکانیزم کنترل مقدار سم پاشیده شده متمرکز بوده (خدایاری و همکاران، ۱۳۸۹؛ مسعودی و همکاران، ۱۳۹۰؛ رفیق و همکاران، ۱۳۹۲؛ مصلی نژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ حجازی پور و همکاران، ۱۴۰۰؛ Wang and همکاران، ۱۳۸۹؛ حیدری و امیری پریان، ۱۳۹۸؛ Kassim et al., 2020) و بسیار اندک بر ناپه‌ری ربات سمپاش تمرکز داشته‌اند (مسعودی و همکاران، ۱۳۸۹؛ حیدری و امیری پریان، ۱۳۹۸؛ Kassim et al., 2020).

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی انحراف ربات سمپاش خودکار خورشیدی از مسیر آموزش داده شده توسط مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده در سطوح و سرعت‌های متفاوت پیشروی است.

مواد و روش‌ها

اجزای مهم ساختار مکانیکی ربات سمپاش

بر روی ربات سمپاش خودکار خورشیدی، متعلقاتی مانند شاسی، چرخ‌ها، موتور الکتریکی، جعبه‌دنده، پیل خورشیدی و باتری ذخیره‌کننده برق و ... نصب شده بود که در ادامه به آن‌ها پرداخته خواهد شد. دستگاه دارای یک شاسی فلزی سبک با ابعاد ۳۷×۶۴ سانتی‌متر، یک چرخ متحرک و فرمانگیر در عقب و دو چرخ محرک در جلو بود. بقیه قسمت‌های دستگاه مانند مخزن سم، نازل پاشش و ... بر روی شاسی نصب شده بودند. برای انتقال قدرت به چرخ‌های جلو به صورت هماهنگ، از دو عدد موتور الکتریکی ۲۴ ولت با قدرت یکسان استفاده شد. با توجه به اینکه موتورهای الکتریکی ۲۴ ولت بودند، از یک عدد باتری ۲۴ ولت ۴۵ آمپر ساعت برای ذخیره انرژی الکتریکی خروجی پیل خورشیدی برای تأمین برق مورد نیاز مدار الکترونیکی استفاده شد (شکل ۱).



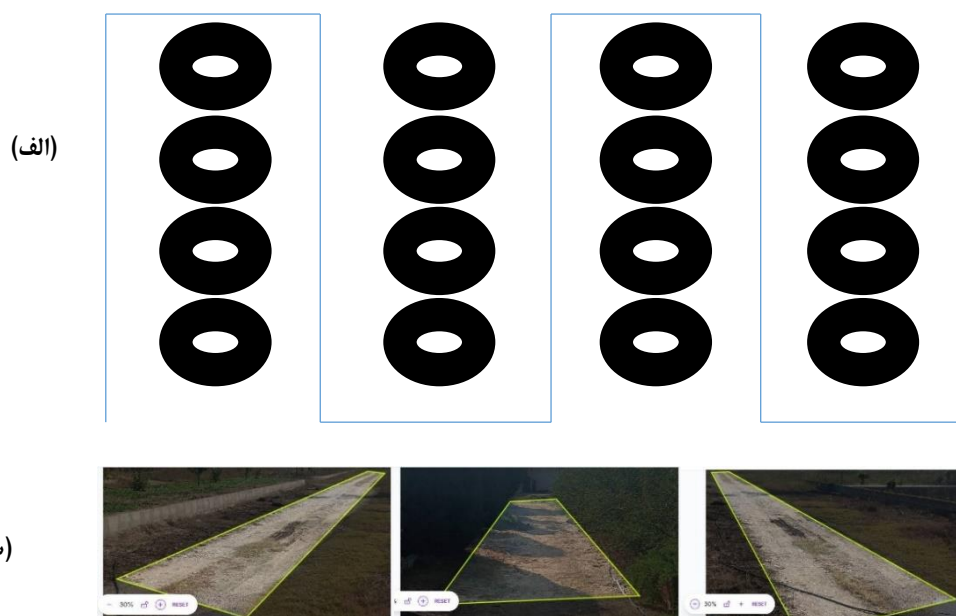
شکل ۱- (الف) طراحی ربات سمپاش در نرم‌افزار سالدورکس، (ب) شاسی و چرخ‌های ربات و (ج) ربات سمپاش خودکار خورشیدی

عمل فرمان‌گیری در چرخ تکی در عقب ربات توسط سروو موتور متصل به آن صورت گرفته و در مواردی که انحراف ربات از مسیر اصلی توسط حسگر تغییر جهت شناسایی شده و به میکروکنترلر فرستاده شود، فرمان تصحیح در فرمان‌گیری را از میکروکنترلر گرفته و به وسیله سروو موتور، عملیات تصحیح مسیر صورت می‌گیرد. در این ربات از پیل خورشیدی برای تبدیل انرژی خورشید به برق قابل ذخیره در باتری استفاده شد که این پیل به صورت مونو کریستال بود. باتری جداگانه برای بخش کنترل و بخش حرکتی ربات وجود داشت. پمپ مورد

استفاده در بخش سمپاشی ربات، دارای یک موتور جریان مستقیم (DC) ۱۲ ولتی بوده و بیشترین دبی آن ۳ لیتر بر دقیقه است. در ربات طراحی شده از یک روش مسافت سنجی آسان با حداقل خطا استفاده شد. بدین منظور ۲ عدد اینکودر چرخشی، یکی بر روی محور چرخ سمت راست و یکی دیگر بر روی محور چرخ سمت چپ نصب شد تا مسافت طی شده در چرخ‌های سمت راست و چپ را به پالس الکترونیکی تبدیل نماید. واحد سمپاش ربات باغ یکی از اجزای اصلی و کلیدی این ربات است که وظایف مهمی را در زمینه بهبود کیفیت و کارایی سمپاشی در محیط‌های باغی بر عهده دارد. دیگر ویژگی‌های سمپاش تحت بررسی شامل پاشش دقیق سموم: واحد سمپاش با استفاده از نازل‌های پیشرفته، سموم را به طور یکنواخت و با دقت بالا بر روی گیاهان پخش می‌کند. این امر موجب می‌شود که تمامی بخش‌های گیاه به صورت کامل و موثر پوشش داده شوند. برای پاشش از یک پمپ ۱۲ ولت دیافراگمی، نازل‌های قابل تنظیم و لانس استیل ضد زنگ برای توزیع سم استفاده شد. اندازه‌گیری سطح مایع: با استفاده از حسگرهای فراصوت، واحد سمپاش می‌تواند سطح مایع در مخزن سم را اندازه‌گیری کرده و در صورتی که میزان مایع به حد معینی برسد، به کاربر اطلاع دهد تا مخزن دوباره پر شود. برنامه‌ریزی و کنترل: واحد سمپاش به وسیله واحد پردازش مرکزی ربات کنترل می‌شود. این واحد می‌تواند بر اساس برنامه‌های از پیش تعیین شده، مکان‌های خاصی را برای سمپاشی انتخاب کرده و عملیات را به صورت خودکار انجام دهد. واحد کنترل و ناوبری ربات شامل میکروکنترلر XIAO ESP32S3 با پشتیبانی از بینایی ماشین، دوربین OV5640 ۵ مگاپیکسل نصب شده در جلوی ربات در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری برای تصویربرداری مسیر و مازول‌های کمکی مثل رله، حسگر فراصوت، گرداننده موتور، کارت اس دی و نمایشگر کاراکتری بود.

ناوبری ربات سمپاش و ارزیابی آن

در این مرحله، ناوبری ربات مورد ارزیابی قرار گرفت. مواردی مانند لغزش چرخ‌های جلو، سرش چرخ عقب، پستی و بلندی‌ها و شکاف‌های زمین، نیروهای خارجی و داخلی وارده به ربات و نیز نقطه اتصال چرخ‌های ربات با زمین در ناوبری ربات لحاظ شد. ربات سمپاش تحت بررسی در این پژوهش برای باغ‌هایی دارای درختان ردیفی با ارتفاع کمتر از ۲۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. فاصله عرضی بین ردیف‌های درخت در محدوده ۳ الی ۴ متر لحاظ شد. محدودیت خاصی در مورد فضای دور زدن ربات سمپاش خودکار خورشیدی در باغ وجود نداشت. نقشه‌برداری، برنامه‌ریزی و اجرا، سه مرحله اصلی در طراحی سیستم ناوبری ربات هستند. در مرحله نقشه‌برداری، با استفاده از داده‌های حاصل از حسگرها، یک مدل محیطی ساخته می‌شود. مرحله برنامه‌ریزی از این مدل برای پیدا کردن مسیر مطلوب از نقطه شروع به نقطه پایان استفاده می‌کند. سپس در مرحله اجرا، ربات با توجه به اطلاعات مذکور، در محیطی که از پیش شناخته شده است، حرکت می‌کند. محیط باغ از راهروهایی تشکیل شده است که ربات باید در این راهروها حرکت کند و در انتهای هر راهرو گردش نموده و وارد راهروی بعدی شود (شکل ۲-الف).



شکل ۲- الف) مسیر شماییک حرکت ربات سمپاش بین درختان و ب) تصاویر برجسب گذاری شده

برای این منظور، یک مکانیزم طراحی شده که ابتدا با استفاده از پروتکل یادگیری ماشین^۱ مسیر به ربات آموزش داده شده و سپس ربات این مسیر را به طور خودکار طی می‌کند. با توجه به این که فضای بین درختان در باغ‌ها معمولاً مسطح نیست، ابتدا برای تعیین انحراف ربات از خط مرکزی فرضی، ربات در یک مسیر مستقیم به طول ۲۰ متر مورد بررسی قرار گرفت. در روی مسیر به فواصل هر ۴ متر (۵ نقطه) فاصله افقی ربات از خط مرکزی فرضی در دو حالت آموزش (کنترل دستی و خودکار) اندازه گیری می‌شد. معیارهای ارزیابی سیستم ناوبری ربات شامل انحراف عرضی مسیر ربات (برحسب سانتی‌متر)، محاسبه خطای RMSE و دقت الگوریتم YOLO در تشخیص مسیر بود. نحوه ارزیابی بدین صورت بود که ربات با سرعت‌های مختلف روی مسیرهای مختلف حرکت داده شد، تصویر مسیر در لحظه توسط دوربین دریافت شد و انحراف مسیر با پردازش تصویر به صورت خودکار محاسبه و ذخیره شد.

جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

برای آموزش مدل YOLOv8، ۵۰۰ تصویر از مسیرهای واقعی حرکت ربات تهیه شده است. این تصاویر شامل سه نوع مسیر هستند: جاده خاکی با سطح ناهموار و سنگریزه، جاده بتنی با سطح هموار و جاده آسفالتی. زاویه دید دوربین در همه تصاویر، دید مستقیم از جلو ربات بوده (نمایی که ربات هنگام حرکت می‌بیند). تصاویر در شرایط نوری مختلف (آفتابی، سایه‌دار، نیمه‌ابری) گرفته شده‌اند تا مدل به شرایط واقعی مقاوم باشد. تصاویر بعد از جمع‌آوری، پیش پردازش شدند که به ترتیب شامل تغییر اندازه، نرمال‌سازی، برچسب‌گذاری مسیر و تقویت لبه‌ها. این تصاویر نقش اصلی در آموزش الگوریتم YOLOv8 برای تشخیص خودکار مسیر قابل حرکت ربات داشتند. پیش از ورود داده‌ها به مدل YOLOv8، تصاویر خام، پیش‌پردازش شدند بدین ترتیب که تغییر اندازه تصاویر به ابعاد ۶۴۰×۶۴۰ پیکسل (مطابق استاندارد)، نرمال‌سازی روشنایی و کنتراست برای افزایش یکنواختی داده‌ها، اعمال افزایش داده Data Augmentation شامل چرخش، قرینه‌سازی افقی، نویز تصادفی و تغییرات روشنایی رنگ به منظور افزایش تاب‌آوری مدل در برابر تغییرات محیطی، برچسب‌گذاری داده‌ها با استفاده از bounding box برای حاشیه‌های مسیر در قالب فرمت YOLO. تعدادی از تصاویر برچسب‌گذاری شده در شکل ۲-ب آمده است.

پس از انجام تنظیمات، فرآیند آموزش مدل انجام شد. مدل در هر اپوچ (epoch)، داده‌های آموزشی را پردازش و دقت (Precision)، یادآوری (Recall) و مقدار mAP را گزارش می‌کرد. به منظور جلوگیری از بیش‌برازش (Overfitting)، از مکانیزم‌های Early Stopping و یادگیری پویا Learning Rate Scheduler استفاده شد. در نسخه‌های جدید Yolo این مکانیزم‌ها وجود دارند و در زمان برنامه‌نویسی پارامتر patience برای فعال‌سازی Early Stopping استفاده می‌شود. همچنین قابل ذکر است فریم‌ورک Ultralytics از چندین نوع Learning Rate Scheduler پشتیبانی می‌کند که می‌توانند از طریق فایل‌های تنظیمات YAML یا آرگومان‌های خط فرمان تنظیم شوند.

پس از اتمام آموزش، مدل توانست به دقت بالا در تشخیص خطوط کناری مسیر در تصاویر جدید (آزمون نشده) دست یابد. خروجی نهایی مدل شامل مختصات دقیق مرزهای مسیر به صورت Bounding Box بود که در گام بعدی با فیلتر گابور تلفیق شد تا مرزها به صورت پیوسته‌تر استخراج و تحلیل گردند.

استفاده از فیلتر گابور برای شناسایی بافت‌های جاده

در این تحقیق، از فیلترهای گابور با زوایای مختلف (۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه) برای شناسایی بافت‌ها و ویژگی‌های خاص در تصاویر جاده‌ای استفاده شده است. فیلتر گابور یکی از ابزارهای قدرتمند برای تشخیص لبه‌ها و بافت‌ها در تصویر است و به ویژه در شناسایی مسیرها و خطوط جاده مفید است. این فیلترها به کمک ماسک‌هایی که از مدل YOLO استخراج شده‌اند، روی تصاویر اعمال شدند تا ویژگی‌های مهم مرتبط با جاده استخراج و تقویت شوند. مراحل پردازش با تلفیق نقشه‌های ویژگی با خروجی مدل YOLOv8 و استخراج دقیق‌ترین خطوط کناری با روش آستانه‌گذاری و تشخیص ناحیه فعال ادامه پیدا کرد.

آزمون‌های مزرعه‌ای

روش آزمون به این صورت بود که ابتدا ربات با کنترل دستی مسیر را طی می‌کرد و در انتهای مسیر متوقف می‌شد. سپس مسیر طی شده توسط یک برنامه در واحد حافظه ربات ذخیره می‌شد. مسیر ذخیره شده دقیقاً از نقطه شروع به صورت مستقل توسط ربات طی می‌شد

1 Machine Learning

2 Gabor

و نهایتاً در یک نقطه متوقف می‌شد. اختلاف این نقطه با نقطه پایان به صورت فیزیکی (دستی) اندازه‌گیری می‌شد که این عدد مقدار انحراف کل ربات از مسیر را نشان می‌داد. این امور برای آزمون نهایی عملکرد ربات است، نه اصلاح بلادرنگ. تصحیح مسیر در حالت پیمایش خودکار بلادرنگ انجام می‌گیرد و ربات در طول مسیر با استفاده از خروجی مدل و الگوریتم کنترلی خود، موقعیتش را اصلاح می‌کند. در اجرای اصلی و بلادرنگ، ربات هیچ داده‌ای از مسیر ذخیره‌شده ندارد. بلکه با کمک تصویر دریافتی از دوربین و مدل YOLO، مسیر را در لحظه تشخیص می‌دهد و با توجه به موقعیت لحظه‌ای نسبت به مرکز مسیر، فرمان اصلاح زاویه چرخ را اجرا می‌کند. انحراف در این حالت، با استفاده از محاسبات داخلی کنترلر (عرض از مرکز مسیر) سنجیده و اصلاح می‌شود.

آزمون‌های مزرعه‌ای در دو فاکتور نوع سطح و سرعت پیشروی انجام گرفت. بدین منظور پس از آموزش مسیر توسط مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده به ربات سمپاش خودکار خورشیدی، آزمون‌هایی با در نظر گرفتن ۲ متغیر ورودی شامل ۳ نوع سطح (آسفالت، بتنی و خاکی دارای سنگریزه) و ۳ سرعت پیشروی (۱، ۲ و ۳ کیلومتر بر ساعت) و ۳ تکرار و مجموعاً ۲۷ آزمون، انجام گرفته و میزان انحراف ربات بر حسب سانتی‌متر از مسیر آموزش داده شده (خط چین زرد رنگ در شکل ۱۲) به عنوان متغیر خروجی اندازه‌گیری شد.

فرآیند تشخیص مسیر و انحراف عرضی ربات شامل تشخیص مسیر با YOLOv8 شامل این مراحل بود. از مدل (YOLOv8n نسخه سبک و سریع YOLO) برای شناسایی مسیر قابل حرکت در تصویر استفاده شد. مدل روی داده‌های برچسب‌گذاری شده مسیرها (جاده خاکی، بتنی و آسفالتی) در محیط Google Colab با استفاده از GPU آموزش دید. خروجی مدل، مختصات محدوده مسیر در تصویر است که به صورت ماسک مشخص می‌شود. سپس، بهبود مرزهای مسیر با فیلتر گابور بدین صورت بود که خروجی YOLO برای تشخیص لبه‌های مسیر کافی نبود، به همین دلیل از فیلتر گابور با زوایای مختلف برای تقویت لبه‌ها و استخراج دقیق مرزهای مسیر استفاده شد. این ترکیب باعث شد مسیر واقعی ربات در تصویر واضح‌تر و دقیق‌تر مشخص شود. و در نهایت محاسبه انحراف عرضی (e) بدین صورت بود که پس از استخراج مسیر، مرکز مسیر (X_c) و موقعیت مرکز ربات (X_r) در تصویر محاسبه شد. انحراف عرضی به صورت تفاضل مرکز مسیر و موقعیت مرکز ربات تعریف شده؛ یعنی فاصله افقی ربات از مرکز مسیر در هر فریم. این انحراف در طول مسیر و در سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت شد. به عبارت دیگر، در ابتدا مسیر با YOLOv8 شناسایی شد سپس با فیلتر گابور لبه‌های تصویر دقیق شد و در نهایت انحراف عرضی با محاسبه فاصله مرکز ربات از مرکز مسیر به دست آمد.

استخراج خطوط جاده و رسم راهنمای بصری

با استفاده از روش‌های پردازش مورفولوژیکی و آستانه‌گذاری، خطوط جاده استخراج شده و با استفاده از کانتورهای بزرگترین نواحی سفید، نقاط لبه بالایی و پایینی جاده تعیین شدند. در نهایت خطوط قرمز رنگ به عنوان خطوط کناری جاده رسم شدند تا نواحی بیرونی مسیر مشخص شوند. خط چین زرد رنگ نیز به عنوان خط میانی جاده به صورت راهنمای ناوبری ترسیم شد (شکل ۱۲).

تعیین میزان انحراف ربات

برای تعیین میزان انحراف ربات از مسیر واقعی در آزمون‌های مزرعه‌ای ربات از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا استفاده شد که از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{e_i^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، e مقدار انحراف ربات از خط شاخص در هر نقطه (مقدار موقعیت ربات بر حسب سانتی‌متر)؛ و n تعداد نقاط مشخص شده در طول مسیر حرکت ربات است (Singh et al., 2005). در تمامی آزمون‌های ربات مقدار RMSE برای همه حالت‌ها و سرعت‌های پیشروی محاسبه شد و بر اساس مقادیر آن، بهترین شرایط برای هدایت ربات تعیین گردید.

برای ارزیابی عملکرد مدل در طول فرآیند آموزش، نمودارهایی مانند train/cls_loss، train/seg_loss، train/box_loss و train/dfl_loss بررسی شده‌اند. این نمودارها نشان‌دهنده میزان خطای مدل در مراحل مختلف آموزش هستند.

train/box_loss این معیار خطای مربوط به شناسایی مکان و ابعاد کادرهای مرزی (bounding boxes) اطراف اشیاء را نشان می‌دهد. کاهش این مقدار به معنای بهبود دقت مدل در تعیین موقعیت دقیق اشیاء است.

train/seg_loss: این معیار به خطای تقسیم‌بندی (segmentation) اشاره دارد که نشان‌دهنده دقت مدل در تشخیص مرزهای دقیق اشیاء یا مناطق خاص (مانند جاده‌ها یا ردیف‌های باغی) است. کاهش این خطا بیانگر توانایی بهتر مدل در جداسازی و شناسایی دقیق مناطق است.

train/cls_loss: این معیار خطای طبقه‌بندی (classification) را نشان می‌دهد که به توانایی مدل در شناسایی نوع یا دسته‌بندی اشیاء (مثلاً جاده خاکی یا آسفالتی) مربوط می‌شود. کاهش این مقدار نشان‌دهنده بهبود در تشخیص نوع اشیاء است.

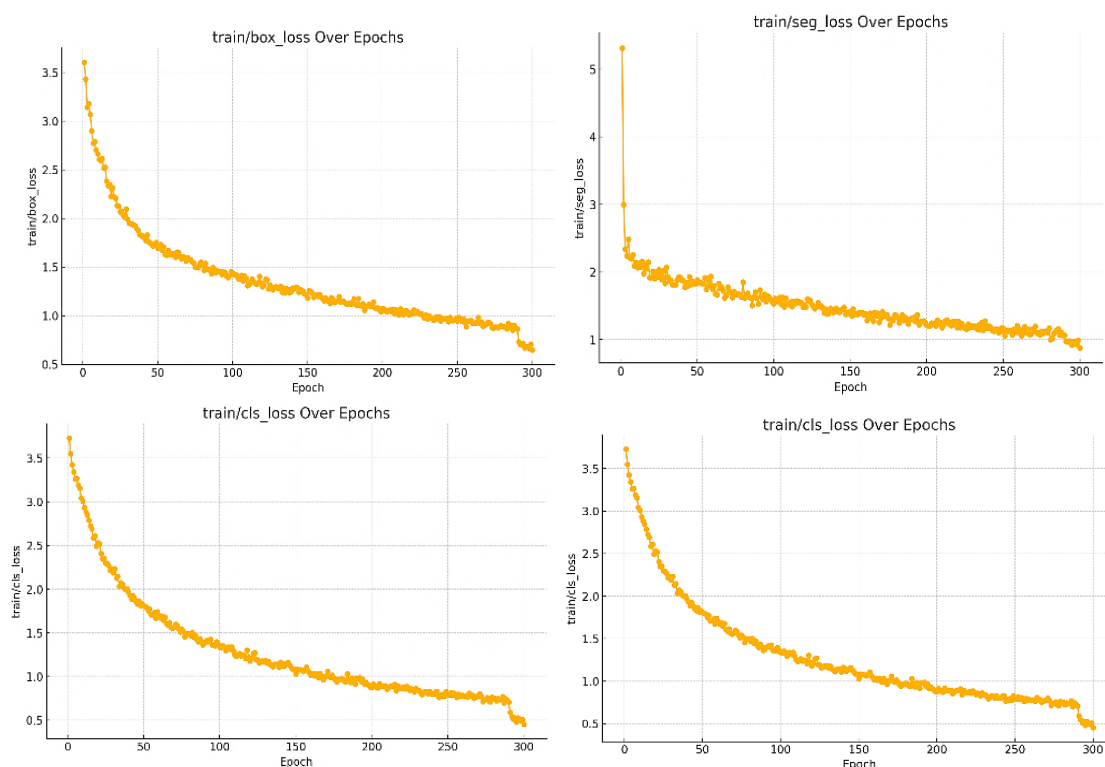
train/df_l_loss: این معیار به خطای توزیع فواصل (distribution focal loss) اشاره دارد که به بهبود دقت در پیش‌بینی‌های مدل کمک می‌کند، به‌ویژه در مواردی که مدل باید جزئیات ریزتری را تشخیص دهد.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل

شاخص‌های خطا در آموزش مدل

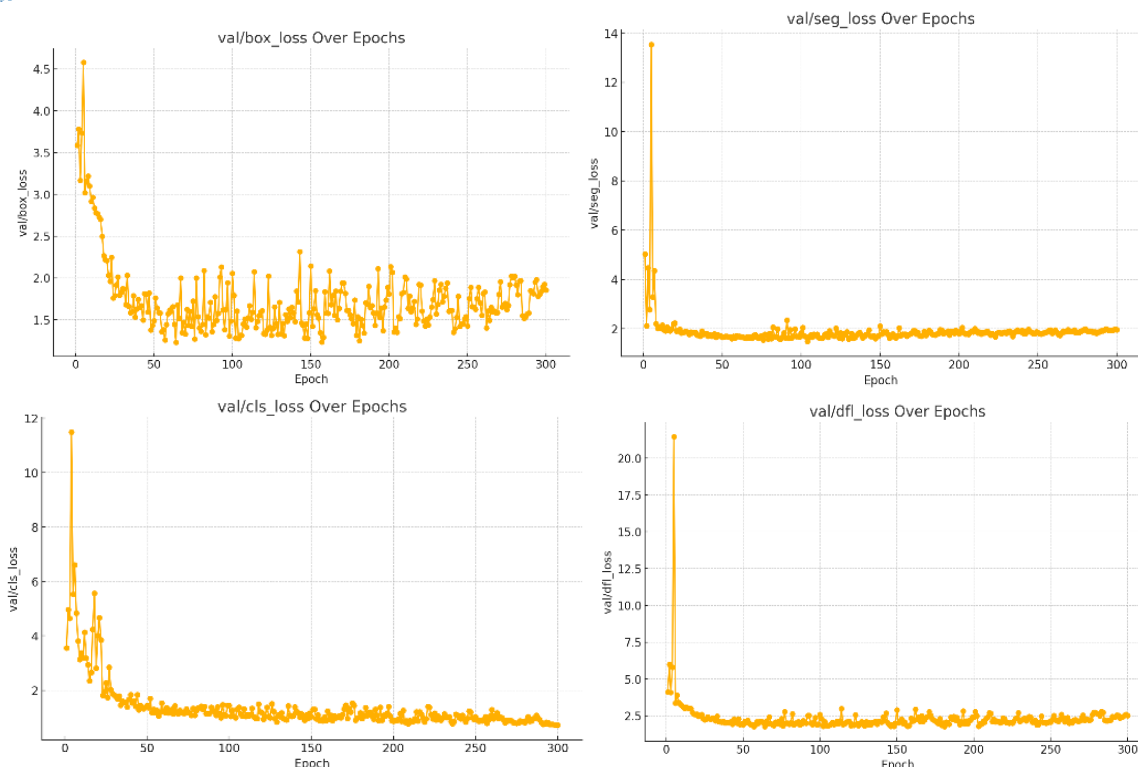
نمودارهای شکل ۳، روند تغییر خطاهای مدل در طول دوره‌های آموزشی را نشان می‌دهند. روند کلی کاهش این شاخص‌ها به مرور زمان حاکی از یادگیری تدریجی مدل و بهبود آن در تطبیق با داده‌های آموزشی است. این کاهش خطا بیانگر توانایی مدل در به حداقل رساندن مقادیر خطا و در نتیجه دقت بیشتر در پیش‌بینی‌ها است.



شکل ۳- روند کاهشی خطاهای مدل در طول دوره آموزش

معیارهای اعتبارسنجی

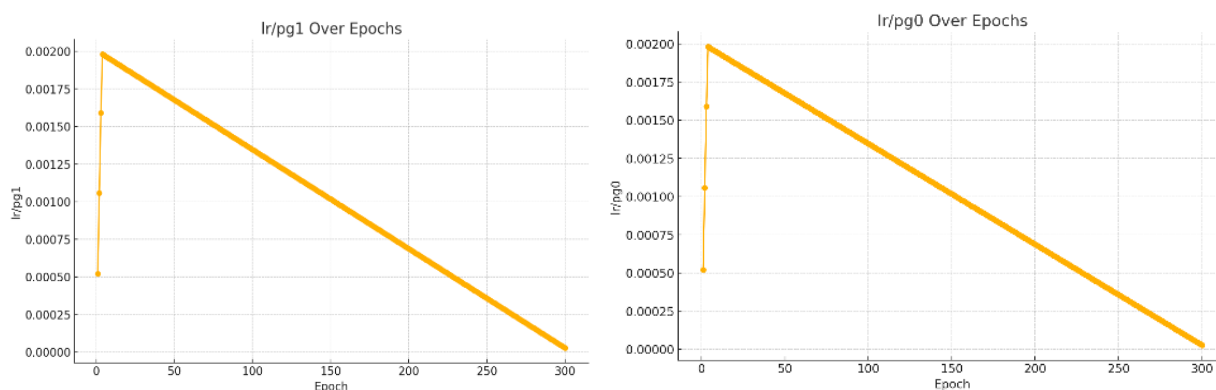
نمودارهای شکل ۴ به ارزیابی خطای مدل بر روی داده‌های اعتبارسنجی می‌پردازد. روند نزولی در این معیارها نیز نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در داده‌های اعتبارسنجی است.



شکل ۴- ارزیابی خطای مدل بر روی داده‌های اعتبارسنجی

نرخ یادگیری

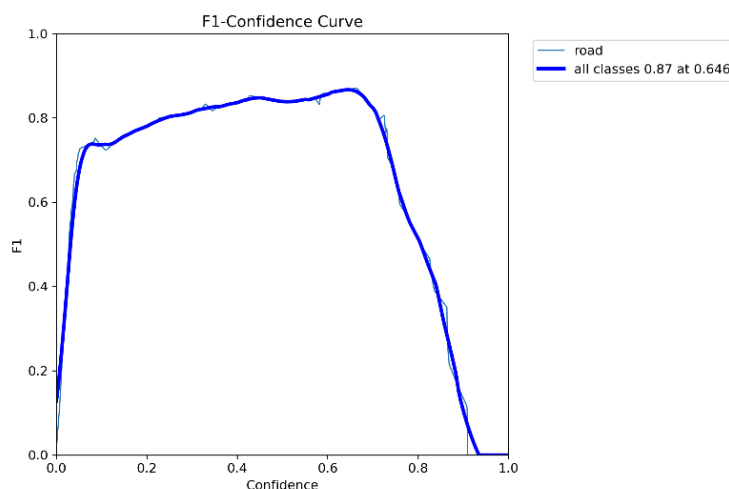
نمودارهای شکل ۵، نشان‌دهنده تنظیمات نرخ یادگیری در بخش‌های مختلف مدل هستند. تنظیم پویا و متناسب نرخ یادگیری با شرایط آموزشی، تأثیر مهمی بر همگرایی بهتر مدل دارد. اگر نرخ یادگیری به صورت بهینه تنظیم نشود، ممکن است مدل نتواند به درستی به حد مطلوب برسد. به همین دلیل، تحلیل روند تغییرات نرخ یادگیری و تطابق آن با شاخص‌های دیگر می‌تواند به بهینه‌سازی بهتر مدل کمک کند.



شکل ۵- تنظیمات نرخ یادگیری در بخش‌های مختلف مدل

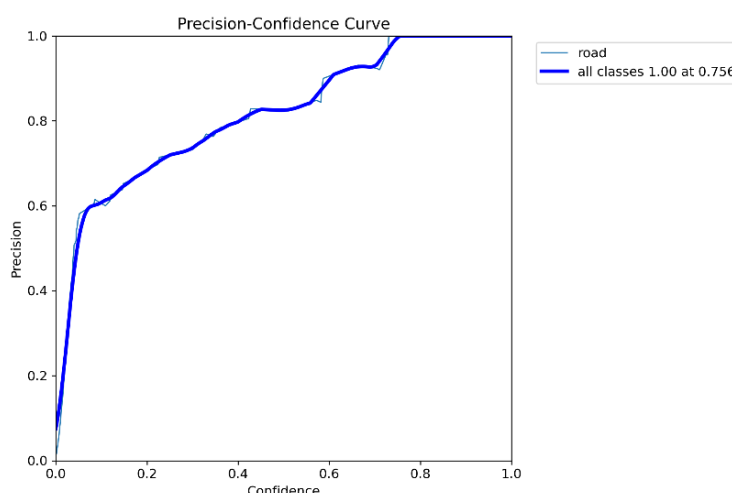
مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده مورد استفاده در پژوهش حاضر توانست به معیارهای ارزیابی بسیار مناسبی در حوزه دقت (precision) و یادآوری (recall) دست یابد. نمودار F1-Confidence Curve (شکل ۶)، رابطه بین سطح اطمینان مدل و مقدار F1-Score را نشان می‌دهد. مقدار F1، معیاری ترکیبی از دقت (Precision) و یادآوری (Recall) است که به ارزیابی تعادل بین این دو شاخص کمک می‌کند. در نمودار شکل ۶، مدل به حداکثر F1 برابر با ۰/۸۷ در سطح اطمینان ۰/۶۴۶ دست یافته است. این مقدار نشان می‌دهد که مدل در این سطح اطمینان به توازن مناسب بین دقت و یادآوری دست یافته است و به خوبی می‌تواند مسیرهای باغی را از سایر بخش‌های تصویر تفکیک کند. در تحقیق مشابه، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019)، از F1-Score برای ارزیابی مدل‌های خود استفاده

کردند و به مقدار ۰/۸۳ دست یافتند که اندکی پایین‌تر از مدل پژوهش حاضر است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل YOLO v8، بهینه‌سازی‌های بهتری در معماری خود داشته و قادر است به دقت بالاتری در شناسایی مسیرهای باغی برسد.



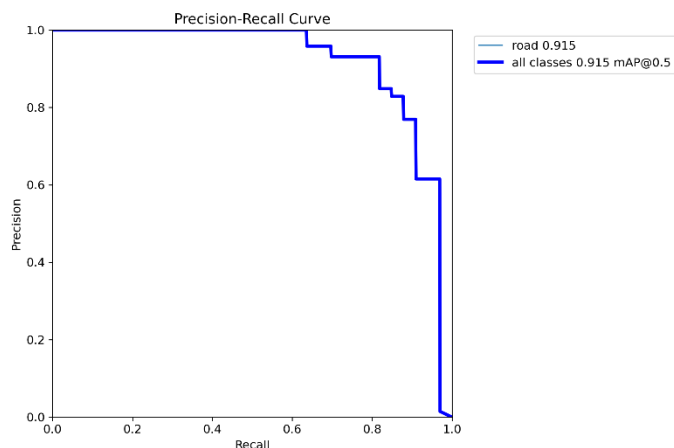
شکل ۶- نمودار F1-Confidence Curve

نمودار Precision-Confidence Curve دقت مدل را در سطح اطمینان‌های مختلف نشان می‌دهد (شکل ۷). در این شکل، مدل به حداکثر مقدار دقت (۱/۰۰) در سطح اطمینان ۰/۷۵۶ رسیده است. این امر، دقت بالا در شناسایی مسیرهای باغی نشان می‌دهد که مدل در سطوح اطمینان بالاتر می‌تواند خطاهای مثبت کاذب را به حداقل برساند که برای کاربردهای عملی در ناوبری ربات خودکار در باغ‌ها اهمیت دارد. در تحقیق مشابه، دوی و بالاسوبرامانیان (Devi and Balasubramanian, 2022)، در بررسی دقت مدل خود برای شناسایی مسیرهای باغی به ۰/۸۶ رسیدند که پایین‌تر از مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده پژوهش حاضر است.



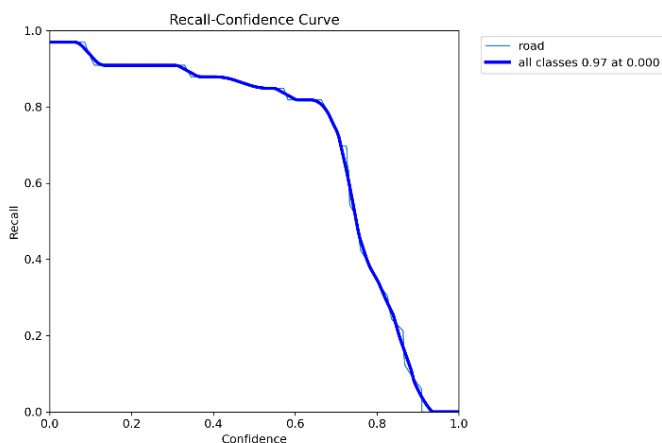
شکل ۷- نمودار Precision-Confidence Curve

نمودار Precision-Recall Curve رابطه بین دقت (Precision) و یادآوری (Recall) را نشان می‌دهد (شکل ۸). مقدار road مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده در این شکل ۰/۹۱۵ است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شناسایی صحیح مسیرهای باغی و تفکیک آن‌ها از سایر اشیاء پس‌زمینه است. این شاخص به ویژه در شناسایی صحیح مسیرها و کاهش موارد منفی کاذب اهمیت دارد. در تحقیقی مشابه، لی و همکاران (Li et al., 2019) مقدار road را ۰/۸۲ گزارش نمودند که نشان‌دهنده کارایی بهتر در دقت و یادآوری به صورت هم‌زمان در مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده است که برای کاربردهای عملی مانند ناوبری ربات خودکار در باغ‌ها اهمیت زیادی دارد.



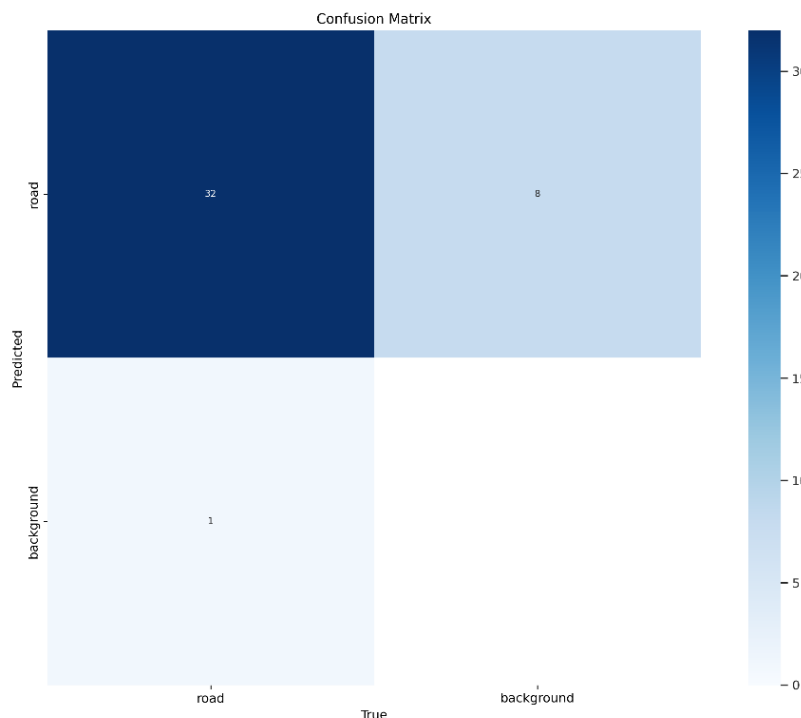
شکل ۸- نمودار Precision-Recall Curve

نمودار Recall-Confidence Curve مقدار یادآوری (Recall) را در سطح اطمینان‌های مختلف نمایش می‌دهد (شکل ۹). مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده در سطح اطمینان ۰/۰۰۰ به مقدار یادآوری ۰/۹۷ دست یافت. این مقدار بالا نشان می‌دهد که مدل تقریباً تمامی نمونه‌های واقعی جاده را به درستی شناسایی می‌کند که این ویژگی برای جلوگیری از خطاهای منفی کاذب در کاربردهای عملی اهمیت زیادی دارد. در مطالعات مشابه، ژیانگ و همکاران (Xiang et al., 2018) گزارش نمودند که دستیابی به یادآوری بالا در محیط‌های طبیعی مانند باغ‌ها چالش‌برانگیز است. در این مطالعه یادآوری مدل تنها به ۰/۷۸ رسید. مدل پژوهش حاضر با دستیابی به مقدار یادآوری ۰/۹۷ نشان داد که معماری به‌روز مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده توانسته چالش‌های شناسایی در محیط‌های پیچیده باغی را بهتر مدیریت کند.



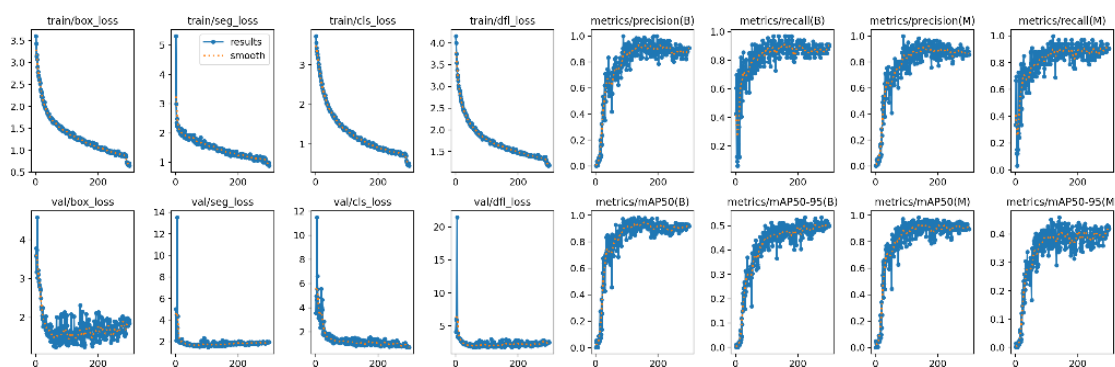
شکل ۹- نمودار Recall-Confidence Curve

ماتریس سردرگمی مدل (Model Confusion Matrix) (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که در ۳۲ مورد، جاده به درستی تشخیص داده شده و تنها در ۸ مورد خطاهای مثبت کاذب (اشتباه شناسایی پس‌زمینه به عنوان جاده) رخ داده است. همچنین تنها یک مورد خطای منفی کاذب مشاهده شده که نشان می‌دهد مدل به‌طور کلی در شناسایی جاده‌ها و مسیرها عملکرد خوبی داشته است. در تحقیق مشابه، وانگ و ناگوچی (Wang and Noguchi, 2016) گزارش نمودند که شناسایی ردیف‌های باغی به دلیل پس‌زمینه‌های پیچیده باغی، باعث افزایش خطاهای مثبت کاذب می‌شود. در تحقیق آن‌ها، مدل به ۱۵ خطای مثبت کاذب دست یافت. در مقایسه، مدل پژوهش حاضر با دستیابی به تنها ۸ خطای مثبت کاذب، نشان‌دهنده بهبود عملکرد در تفکیک جاده از پس‌زمینه است.



شکل ۱۰- ماتریس سردرگمی مدل

نمودارهای شکل ۱۱، میزان خطاهای مختلف (Loss) در طول مراحل آموزش و اعتبارسنجی را نشان می‌دهند. کاهش تدریجی مقادیر loss و همگرایی آن‌ها به یک مقدار ثابت نشان‌دهنده همگرایی مناسب مدل است که به معنی بهینه‌سازی موفق فرآیند یادگیری می‌باشد. مقادیر نهایی loss پایین نشان‌دهنده آن است که مدل به خوبی قادر به تشخیص جاده‌ها و مسیرها بوده و از overfitting جلوگیری شده است. در تحقیق مشابه، کسیم و همکاران (Kassim et al., 2020) در گزارش نمودارهای loss بیان نمودند که مدل به دلیل پیچیدگی‌های موجود در محیط باغی به مشکل overfitting دچار شده است. مدل پژوهش حاضر با داشتن مقادیر نهایی loss پایین و همگرایی مناسب این مشکل را نداشته و نشان می‌دهد که توانایی بالاتری در تعمیم به داده‌های جدید دارد.



شکل ۱۱- میزان خطاهای مختلف در طول مراحل آموزش و اعتبارسنجی

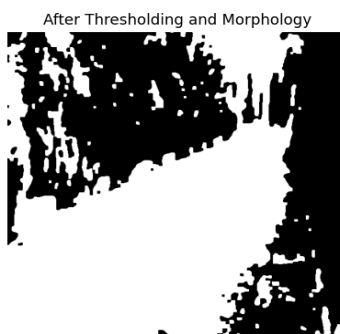
تحلیل نتایج تصویری

تصاویر خروجی نشان می‌دهند که روش استفاده شده به‌خوبی قابلیت تشخیص و استخراج مسیر را دارد، به ویژه در شرایطی که نوع سطح جاده تغییر می‌کند. این پردازش‌ها باعث افزایش دقت در تشخیص مسیر و کاهش میزان انحراف ربات در نوبری می‌شوند (شکل ۱۲- الف).

(الف)



(ب)



شکل ۱۲- الف) رسم خطوط کناری (قرمز رنگ) و میانی (زرد رنگ) در پردازش بصری و استخراج ناحیه‌های مورد نظر با استفاده از YOLO و ب) قدرت فیلتر گابور در بهبود تشخیص مسیر

تصاویر خروجی پردازش شده نشان می‌دهند که فیلترهای گابور با تشخیص لبه‌ها و ساختارهای جاده به شناسایی و تفکیک جاده از پس‌زمینه کمک می‌کنند (شکل ۱۲-ب). این فیلتر همچنین باعث برجسته‌سازی خطوط جاده می‌شود و آن را از سایر بخش‌های تصویر متمایز می‌کند، که برای ناوبری ربات‌ها در مسیرهای غیرمسطح و متفاوت بسیار مهم است. مدل YOLO برای شناسایی ناحیه‌های جاده و ایجاد ماسک‌های مورد نیاز برای پردازش دقیق‌تر به کار برده شد. این ماسک‌ها به عنوان پایه‌ای برای اعمال فیلترها و همچنین استخراج ناحیه‌های خاص جاده‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. سپس از طریق ماسک‌های ایجاد شده، ناحیه جاده جدا و با ترکیب نتایج فیلتر گابور بهبود داده شد.

نتایج آماری

تأثیر سرعت پیشروی بر انحراف ربات

آزمون تجزیه واریانس (جدول ۱) برای بررسی تفاوت‌های معنادار میان انحرافات ربات در سطوح متفاوت و سرعت‌های تحت بررسی (۱، ۲ و ۳ کیلومتر بر ساعت) نشان داد که میزان سرعت پیشروی اثر معناداری بر انحراف ربات دارد. با توجه به p -value کمتر از ۰/۰۱، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در سرعت به‌طور قابل توجهی موجب تغییر در انحراف ربات از مسیر می‌شود. در ادامه، نتایج آزمون توکی (Tukey) نیز نشان داد که انحراف ربات در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت به‌طور معناداری بیشتر از سرعت‌های ۱ و ۲ کیلومتر بر ساعت است. بنابراین، این تغییرات سرعتی به‌طور مستقیم بر دقت حرکت ربات تأثیر می‌گذارند، به‌خصوص در سرعت‌های بالا که ربات به‌سختی می‌تواند مسیر را با دقت حفظ کند.

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر عوامل تحت بررسی بر انحراف ربات

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
نوع سطح	۲	۱۶۳/۷۴۳**
سرعت پیشروی	۲	۱۲۰/۹۳۸**
سطح × سرعت	۴	۲۴/۹۶۰**
خطا	۱۸	۰/۰۴۵
کل	۲۶	

تأثیر نوع سطح بر انحراف ربات

نتایج جدول ۱ نشان داد که نوع سطح جاده تأثیر قابل توجهی بر انحراف ربات دارد. طبق نتایج تجزیه واریانس، تفاوت معناداری بین انحرافات ربات در جاده‌های مختلف وجود دارد. سطح خاکی دارای سنگریزه بیشترین انحراف را نشان داد در حالی که سطوح آسفالت و بتن کمترین میزان انحراف را داشتند. این نتیجه نشان‌دهنده این است که ربات‌ها در جاده‌های نرم‌تر و ناهموار مانند جاده‌های خاکی، به دلیل سطوح کمتر قابل پیش‌بینی و اصطکاک کمتر، دقت کمتری در حفظ مسیر دارند.

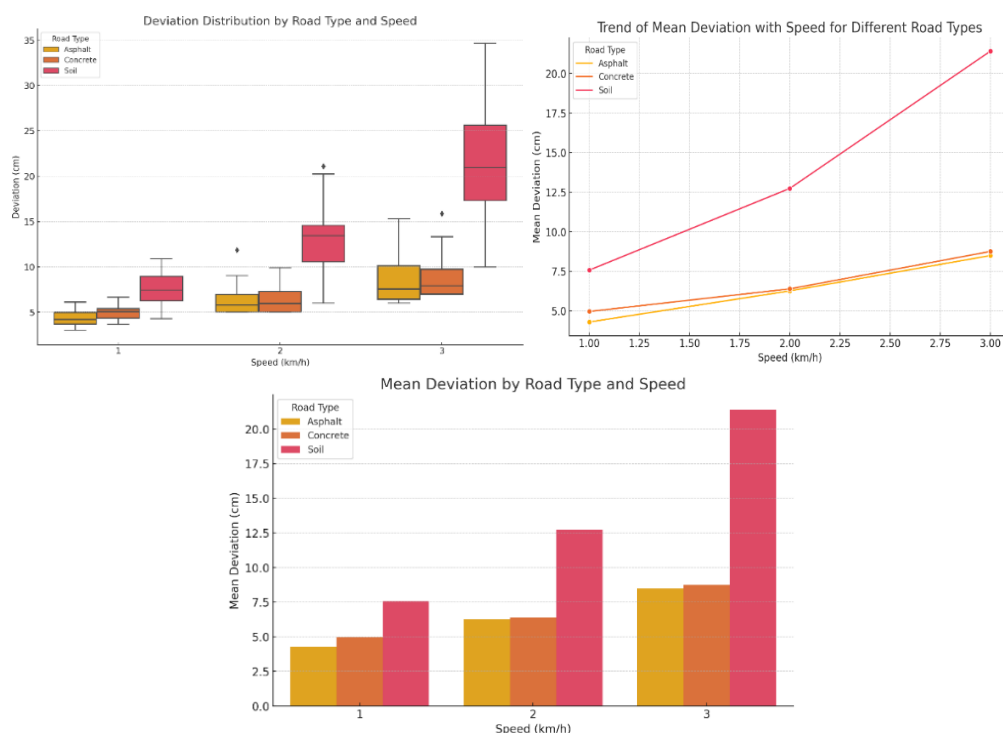
علاوه بر این، نتایج آزمون همبستگی نشان داد که بین نوع جاده و انحراف ربات همبستگی مثبت و معناداری وجود دارد. این یافته نشان می‌دهد که با تغییر نوع جاده از آسفالت به خاکی دارای سنگریزه، انحراف ربات افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده حساسیت بالای ربات‌ها به تغییرات سطح جاده است.

توزیع انحرافات و بررسی ویژگی‌های داده‌ها

نمودارهای جعبه‌ای و پراکندگی

تجزیه و تحلیل توزیع انحرافات در سرعت‌های مختلف و انواع جاده‌ها، الگوهای مشابهی را نشان دادند. نمودار جعبه‌ای نشان داد که در سرعت زیاد (۳ کیلومتر بر ساعت)، ربات سمپاش تمایل به انحراف بیشتر از مسیر دارد و در جاده‌های خاکی دارای سنگریزه نیز این انحرافات به‌طور قابل توجهی بیشتر است. از سوی دیگر، جاده‌های آسفالت و بتن نسبت به جاده‌های خاکی عملکرد بهتری در حفظ مسیر دارند. پراکندگی نیز تأیید کرد که سرعت‌های بالاتر به‌طور معناداری با افزایش انحراف ربات از مسیر همراه است، به‌ویژه در جاده‌های خاکی دارای سنگریزه که امکان خطا در مسیر ربات بیشتر است (شکل ۱۳).

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که میزان انحراف ربات در تمامی سرعت‌های پیشروی تحت بررسی در سطوح آسفالت و سیمانی بهم نزدیک بوده اما در سطح خاکی بسیار متفاوت با آن دو بوده است.



شکل ۱۳- نمودارهای جعبه‌ای و پراکندگی در توزیع انحرافات و بررسی ویژگی‌های داده‌ها

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی انحراف ربات سمپاش خودکار خورشیدی از مسیر آموزش داده شده توسط مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده در ۳ سطح (آسفالت، بتن و خاکی دارای سنگریزه) و ۳ سرعت متفاوت (۱، ۲ و ۳ کیلومتر بر ساعت) اجرا شد. برای تحلیل آماری، از آزمون‌های آماری توصیفی و مقایسه‌ای برای بررسی انحراف در جاده‌های مختلف و تأثیر سرعت استفاده شد. نتایج نشان داد که سرعت

بالا و سطح ناهموار جاده دو عامل اصلی در افزایش انحراف ربات از مسیر هستند. سرعت پیشروی، نوع سطح و اثر متقابل آن‌ها بر میزان انحراف ربات از مسیر آموزش داده شده معنی‌داری بودند به گونه‌ای که ربات در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت و جاده خاکی دارای سنگریزه، بیشترین (۲۱/۴۱ سانتی‌متر) و در سرعت ۱ کیلومتر بر ساعت و سطح آسفالت، کمترین (۴/۲۹ سانتی‌متر) میزان انحراف را داشت. تحلیل نتایج مدل YOLO v8 در شناسایی مسیرهای باغی نشان‌دهنده عملکرد بالای آن در دقت، یادآوری و کاهش خطاهای مثبت و منفی کاذب است. مدل YOLO v8 بهینه‌سازی شده، با دقت و قابلیت تعمیر بالا، خود، عملکرد بسیار مناسبی در ناوبری ربات سمپاش نشان داد و برای کاربردهای عملی همچون ناوبری خودکار در محیط‌های باغی بسیار مناسب است. پردازش تصویری با استفاده از فیلتر گابور و روش‌های پردازش مورفولوژیکی به بهبود دقت مدل کمک کرد و توانست ویژگی‌های مسیرها را به‌خوبی تفکیک کند. مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که مدل جدید بهبودهای قابل‌توجهی نسبت به سایر روش‌ها دارد و برای کاربردهای عملی در زمینه ناوبری خودکار و شناسایی مسیرهای باغی مناسب است. این یافته‌ها می‌توانند برای بهینه‌سازی الگوریتم‌های هدایت ربات‌ها در شرایط مختلف محیطی و سرعت‌های مختلف مفید باشند.

منابع

- حجازی پور، حجت؛ مساح، جعفر؛ آصف پور وکیلان، کیوان؛ سربانی، محسن و چگینی، غلامرضا (۱۴۰۰). طراحی، ساخت و ارزیابی مکانیزم ربات محلولپاش اتوماتیک به هدف افزایش بهره‌وری. *مهندسی زراعی*، ۴۴(۱)، ۱۹-۱.
- حیدری، احمد (۱۳۹۸). طراحی، ساخت و ارزیابی ربات سمپاش گلخانه. *پایان‌نامه کارشناسی ارشد*. به راهنمایی جعفر امیری پریان. همدان: دانشگاه بوعلی سینا. ۹۱ ص.
- خدایاری، علیرضا؛ معنوی زاده، نگین و احمدی کرمانشاهی، مرتضی (۱۳۸۹). طراحی و ساخت و کنترل هوشمند یک ربات متحرک برای فرآیند تعقیب مسیر. *سیزدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران*، تهران.
- رفیق، علیرضا؛ مشهدی میغانی، حمید؛ کلاتری، داود و موسوی خراسانی، مسعود (۱۳۹۲). اتوماسیون سمپاشی گلخانه‌ها به کمک ربات سیار. *علوم مکانیک در ماشین‌های کشاورزی*، ۱۱(۱)، ۶۵-۷۳.
- مسعودی، حسن (۱۳۹۴). رباتیک در گلخانه‌ها. *نهمین کنگره علوم باغبانی ایران*. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- مسعودی، حسن؛ امید، محمود؛ علیمردانی، رضا؛ محتسبی، سیدسعید و باقری شورکی، سعید (۱۳۸۹). بررسی آزمایشگاهی توانایی حسگرهای فراصوتی در تعیین جهت و موقعیت روبات‌های متحرک برای کاربردهای گلخانه‌ای. *مهندسی بیوسیستم ایران*، ۴۱(۱)، ۶۹-۷۹.
- مسعودی، حسن؛ علیمردانی، رضا؛ امید، محمود؛ محتسبی، سیدسعید و باقری شورکی، سعید (۱۳۹۰). طراحی، ساخت و ارزیابی یک روبات متحرک برای انجام عملیات سمپاشی در گلخانه. *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۱۲(۲)، ۸۷-۱۰۰.
- مصطفی‌نژاد، حسین؛ مینایی، سعید؛ برقی، علی محمد و بهفر، فرزانه (۱۳۹۷). طراحی و ساخت ربات اختصاصی سمپاش گلخانه‌ای و آزمون عملکرد آن. *چهارمین همایش ملی علوم و فناوری‌های نوین ایران*، تهران.

REFERENCES

- Bechar, A., & Vigneault, C. (2017). Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems engineering*, 153, 110-128. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>.
- Cantelli, L., Bonaccorso, F., Longo, D., Donato Melita, C., Schillaci, G., & Muscato, G. (2019). A small versatile electrical robot for autonomous spraying in agriculture. *AgriEngineering*, 1(3), 391-402. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1030029>.
- Devi, K. G., Kumar C, S., & Balasubramanian, K. (2022). A survey on the design of autonomous and semi autonomous pesticide sprayer robot. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 9(1), 371-381. <https://doi.org/10.31202/ecjse.1005808>.
- Han, J.h., Park, C.H., Kwon, J.H., Lee, J., Kim, T.S., & Jang, Y.Y. (2020). Performance evaluation of autonomous driving control algorithm for a crawler-type agricultural vehicle based on low-cost multi-sensor fusion positioning. *Applied Sciences*, 10(13), 4667. <https://doi.org/10.3390/app10134667>.
- Han, J.h., Park, C.H., Jang, Y.Y., Gu, J.D., & Kim, C.Y. (2021). Performance evaluation of an autonomously driven agricultural vehicle in an orchard environment. *Sensors*, 22(1), 114. <https://doi.org/10.3390/s22010114>.
- Heidari, A. (2019). Design, construction and evaluation of greenhouse sprayer robot. MSc thesis. Hamedan: Bou Ali Sina University. 91p. (in persian).
- Hejazipour, H., Massah, J., Asefpour-vakilian, K., Sariani, M., Chegini, Gh. (2021). Design, manufacture and

- evaluation of automatic spraying mechanism in order to increase productivity. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 44(1), 1-19. (in persian).
<https://doi.org/10.22055/agen.2021.34892.1586>.
- Kassim, A.M., Termezai, M.F.N.M., Jaya, A.K.R.A., Azahar, A.H., Sivarao, S., Jafar, H.I., & Aras, M.S.M. (2020). Design and development of autonomous pesticide sprayer robot for fertigation farm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(2), 545-551.
<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110269>
- Khodayari, A., Manavi zade, N., & Ahmadi kermanshahi, M. (2010). Design, construction and intelligent control of a mobile robot for path following process. 13th Iranian Electrical Engineering Student Conference, Tehran. (in persian).
- Kurdi, M.M., & Elzein, I.A. (2022). Trajectory and Motion for Agricultural Robot. 2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/DASA54658.2022.9765282>.
- Li, Y., Sun, H., Liu, D., Xu, J., & Wang, M. (2019). Autonomous Navigation and Path Tracking Control on Field Roads in Hilly Areas. *Journal of Sensors*, 9(3), 1-15. <https://doi.org/10.1155/2019/6738594>.
- Masoodi, H. (2015). Robotics in the greenhouses. The 9th Congress of Iranian Horticultural Sciences. Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. (in persian).
- Masoodi, H., Omid, M., Alimardani, R., Mohtasebi, S.S., & Bagheri Sjooraki, S. (2010). A Laboratory Study of Ultrasonic Sensors to Determine Position and Orientation of Mobile Robots for Greenhouse Applications. *Iran Journal of biosystems Engineering*, 41(1), 69-79. (in persian).
- Masoudi, H., Alimardani, R., Omid, M., Mohtasebi, S.S., & Bagheri Sjooraki, S. (2011). Design, fabrication and evaluation of a mobile robot for spraying in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(2), 87-100. (in persian).
- Meshram, A.T., Vanalkar, A.V., Kalambe, K.B., & Badar, A. M. (2022). Pesticide spraying robot for precision agriculture: A categorical literature review and future trends. *Journal of Field Robotics*, 39(2), 153-171.
<https://doi.org/10.1002/rob.22043>.
- Mosallanejad, H., Minaei, S., Borghei, A.M., & Behfar, F. (2018). Design and construction of a dedicated greenhouse sprayer robot and its performance testing. The 4th National Conference on Modern Sciences and Technologies of Iran, Tehran. (in persian).
- Ozgul, E., & Celik, U. (2018). Design and implementation of semi-autonomous anti-pesticide spraying and insect repellent mobile robot for agricultural applications. The 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE) (pp. 233-237). IEEE.
- Rafigh, A., Mashhadi Mighani, H., Kalantari, D., & Khorasani, M. (2013). Greenhouse spraying automation using mobile robots. *Mechanical Sciences in agricultural machinery*, 1(1), 65-73. (in persian).
- Riley, B., & Siensen-Newman, L. (2003). "Health Hazards Posed to Pesticide Applicators", Northwest Coalition for Alternatives to Pesticides, 17-24.
- Sánchez-Hermosilla, J., González, R., Rodríguez, F., & Donaire, J.G. (2013). Mechatronic description of a laser autoguided vehicle for greenhouse operations. *Sensors*, 13(1), 769-784.
<https://doi.org/10.3390/s130100769>.
- Ünal, İ., & Topakci, M. (2015). Design of a Remote-controlled and GPS-guided Autonomous Robot for Precision Farming. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(2), 180-194.
<https://doi.org/10.5772/62059>.
- Wang, H., & Noguchi, N. (2016). Autonomous maneuvers of a robotic tractor for farming. The IEEE/SICE International symposium on system integration (SII). IEEE.
- Xiang, Y., Du, J., Geng, D., & Jin, Ch. (2018). Development of an automatically guided rice transplanter using RTK-GNSS and IMU. *IFAC-PapersOnLine*, 51-17, 374-378.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.193>.
- Zhang, T., Zhou, W., Meng, F., & Li, Zh. (2019). Efficiency analysis and improvement of an intelligent transportation system for the application in greenhouse. Book Chapter, *Intelligent Transportation Systems*, ISBN: 978-3-0365-0506-0, 233-257.